

波長選択的像形成による歴史資料の画像解析に関する基礎検討

Basic Study on Imagery for Historical Artifacts Based on Spectral Selective Imaging Systems

宮田公佳

MIYATA Kimiyoshi

はじめに

① 写真撮影の分光的議論

② 撮影画像の解析

③ 考察

まとめ

[論文要旨]

撮影画像から被写体の分析を行う画像解析の手法を文化財へ応用するための基礎検討を行った。画像解析を行うためには専用の装置が必要となることも多いが、近年では高性能化した画像機器を測定器として活用できる可能性が高くなったことで、画像解析に対するハードルは低くなっている。本研究では、科学的あるいは化学的な分析手法との連携を視野に入れ、一般的な写真撮影技術を基本とした簡便な手法によって資料分析に有用な情報を抽出することを目指している。そのための基礎検討として、画像撮影時に使用する光源とフィルタによって、画像化に寄与する光の波長を選択する手法に着目した。対象資料として、研究用資料である火縄銃と錦絵を用いている。本研究は基礎検討の段階であるため、抽出された資料情報が分析上有意であると結論づけるのは困難である。しかしながら、画像解析の有用性の検証には事例の積み重ねが必要であり、本研究による結果もその一例として位置付けられる。本研究で使用した波長選択が可能な光源、あるいは画像処理技術との組み合わせによる画像解析事例を収集し、有効性を継続検討する必要がある。

画像の中には多くの情報が含まれているが故に、解析に必要な情報が隠蔽されている可能性がある。波長選択という手段は、そのような膨大な画像情報の中から解析に必要な情報を抽出する手段の一つとなる。本稿で述べた波長選択手段は、個別に適用するだけでなく、互いに組み合わせることでより解析の精度を高めることが可能であるが、どのように組み合わせることが有機的な方法なのか、また画像解析と科学的あるいは化学的分析手法との連携方法を構築することが今後の研究課題である。

【キーワード】 分光画像, 画像技術, フィルタリング, 画像解析

はじめに

歴史資料の写真撮影は、研究過程あるいは博物館活動において日常的に行われている。撮影された画像の利用方法は様々であり、デジタルカメラ等の画像機器やインターネット等の通信インフラの整備によって画像の利用方法、利用分野は拡大している。撮影された画像に基づいて被写体に関する情報を分析する手法は画像解析と呼ばれているが、この画像解析も画像の利用方法の一つである。歴史資料に対して行われる画像撮影において、一工夫を加えることで画像解析への道が拓けるとすれば、歴史研究や博物館活動において有用と考えられる。歴史資料は多種多様であるため、画像解析によってまず効率的な解析を初期資料分析として行い、その結果から詳細分析が必要とされたならば、専門的機材を用いた科学的あるいは化学的な詳細分析へと引き継ぐなど、資料分析における役割分担の一手法としても期待される。そこで本稿では、画像撮影時に使用する光源とフィルタを選択することで、撮影画像から資料情報を解析するための基礎的手法について議論する。光源とフィルタを選択することの意義は、撮影に寄与する光の波長を選別することで、分析のための情報を抽出するための手段として用いることにある。

画像解析を行うためには専用の装置が必要となることも多いが、高性能化した画像機器を測定器として活用できれば、画像解析に対するハードルは低くなる。デジタルカメラによる撮影は、被写体に関する情報取得に相当することから、画像解析において重要な役割を果たすこととなる。しかし、画像解析のために設計製作された装置ではないため、画像解析を実際に行うためには、画像の形成プロセスを理解した上での分析が実施されなければならない。そこでまず、画像が形成されるプロセスについて述べる。

画像として形成される光情報は、照明光が被写体表面で反射された結果であり、その反射強度を示す反射率は次式で与えられる。

$$R = \frac{I_o}{I_i} \quad (1)$$

式(1)において、 I_i と I_o は対象物体への入射光と反射光のエネルギーであり、反射率はその比率となる。一様な照明エネルギー下で高い反射率の物体を撮影すれば、画像としては明るい領域となり、反射率が低ければ暗い領域となる。カラーチャートのように、反射率が均質な物体に対しては式(1)で十分であるが、一般的に被写体表面の反射率は位置によって変化するため、横方向と縦方向の位置を示す変数 (x, y) を用いて、次式のように位置の関数として反射率が表される。

$$R(x, y) = \frac{I_o(x, y)}{I_i(x, y)} \quad (2)$$

デジタル画像に関しても同様に、横方向の画素位置と縦方向の画素位置 (x, y) の関数として表現することができる。 $R(x, y)$ はアナログ量であるため、デジタル化の際には最暗部と最明部を定めて、その間を256段階などの数値を割り当てることで $R(x, y)$ がデジタル値に変換される。現実にはア

ナログ値からデジタル値への変換過程では、非線形処理を含む高次変換が行われている。この際の256段階という値の意味は2の8乗からきており、2のべき乗がビット数となることから8ビット画像とも呼ばれる。一般的な画像であれば1画素あたり8ビットで十分であるが、医療分野などでは8ビットを超えた数値の割り当てが行われることもある。

式(2)において、一様な入射光であれば位置 (x, y) を省略することができる。一方、3次元物体を対象とする際には奥行きに関する変数 z が増えて (x, y, z) となり、時間と共に変化することを含めるとさらには時間に関する変数 t が加えられて (x, y, z, t) となる。本稿では、2次元撮像素子によって獲得された静止画像を解析対象とし、被写体の経時変化も議論の対象としないことから奥行きと時間については省略する。しかし、反射率は光の波長に依存することから、光の波長を表す変数 λ を導入した式(3)によって反射率を表すこととする。

$$R(x, y, \lambda) = \frac{I_o(x, y, \lambda)}{I_i(x, y, \lambda)} \quad (3)$$

本稿で議論する波長選択とは、式(3)における λ を選択することに相当する。光は電磁波の一種で波としての性質を有している。光を波として表現したときの波長が λ であり、波長の長い光は赤色と観察され、波長の短い光は青色と観察される。人間の色覚が認識できる範囲を可視波長域と呼び、より長波長側の光が赤外線、より短波長側の光が紫外線となる。反射以外にも透過や吸収、屈折、散乱等も光の波長に依存するため、波長の関数として表されなければならない。このように光の波長の関数として表すことを分光といい、式(3)で表される反射率は分光反射率と呼ばれ、類似の用語に分光透過率や分光吸収率などがある。分光された光はスペクトルとも呼ばれるため、分光的分析はスペクトル分析とも呼ばれる。

物体の分光反射率は、対象物体を光学的に議論するための基礎的かつ客観的な情報であることから、画像解析の目標の一つは、式(3)で表される被写体の分光反射率を求めることとなる。文化財の分光反射率を測定することができれば、色材の分析などに応用することができるが、それを実現するためには分光情報を取り扱うことのできる計測機器が必要となり、さらにそのような計測機器では、紫外線蛍光写真などの例を除けば、一般に微細な領域の分光反射率を計測することは困難である。そこで、照明や撮影時に使用するフィルタの分光特性を変化させることで、厳密ではないまでも、一般的な写真撮影手段を原則としながらも、被写体に関する情報を抽出する手法を検討する。

①……………写真撮影の分光的議論

1.1 デジタル画像の生成過程

デジタルカメラのセンサは、CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 等に代表される光電変換素子が受光した光の強度に応じた電気信号を出力する。人間の眼も光電変換を行うセンサとしては同義であるが、多くの相違点もあり分光特性の違いはその一つである。光電変換素子が分光感度を有する波長域は可視波長域とは異なるため、デジ

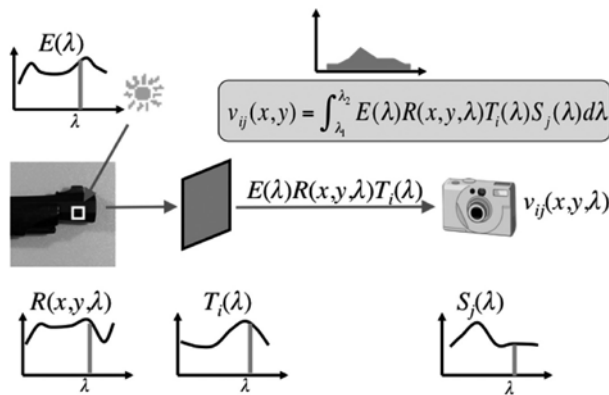


図1 分光情報の取り扱い方の模式図

タルカメラで撮影された画像の色再現を考える際には問題となるが、人間の眼では見ることで見えない情報であっても光電変換素子ならば獲得できる可能性がある。赤外線画像による不可視情報の可視化などは、この特性の応用事例である。画像を分析目的で利用するには、撮影された結果としての画像だけでなく、画像形成の過程で光の波長成分がどのように影響しているかを考えることが重要となる。図1は、光の波長に着目したセンサ応答の生成過程を模式的に示している。図において、光の波長を λ として、光源の分光分布を $E(\lambda)$ 、物体表面の分光反射率を位置の関数として $R(x,y,\lambda)$ 、フィルタの分光透過率を $T_i(\lambda)$ 、センサの分光感度を $S_j(\lambda)$ 、フィルタの種別を i 、センサの種別を j とすると、位置 (x,y) に対するセンサ出力値 $v_{ij}(x,y)$ は、各分光要素の積を積分することで次式により求められる。

$$v_{ij}(x,y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)R(x,y,\lambda)T_i(\lambda)S_j(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

一般的なデジタルカメラのカラーセンサは赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の3種類であるため $j=1, 2, 3$ となるが、モノクロデジタルカメラの場合には $j=1$ となる。式(4)は、波長成分毎の積を下限波長 λ_1 から上限波長 λ_2 まで積分すればセンサ出力値が得られることを表している。人間の視覚系でも同様で、例えばサングラスをフィルタ、網膜上の光受容体をセンサ感度としても式(4)は成立する。

1.2 波長選択性について

図1において着目すべき事は、画像形成における最上流工程は被写体に対する照明であるという点である。また、波長成分を選択する方法にもいくつかの方法があり、端的にはフィルタを変更して分光透過率を変化させる手法となるが、デジタルカメラを変更する、あるいは照明を変更する等の手法によっても波長選択を実現できる。図1では被写体からの反射光に対してフィルタが作用するように図示されているが、入射光に対してフィルタを作用させることも可能である。さらに、光源として特定波長成分のみを有するものを利用すれば、光源自体が波長選択性を有することになる。一般的なデジタルカメラでは赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の3種類のセンサが用いられているこ

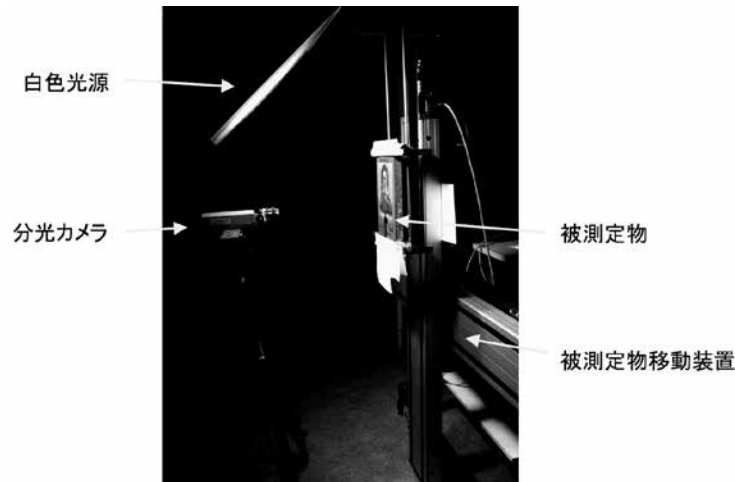


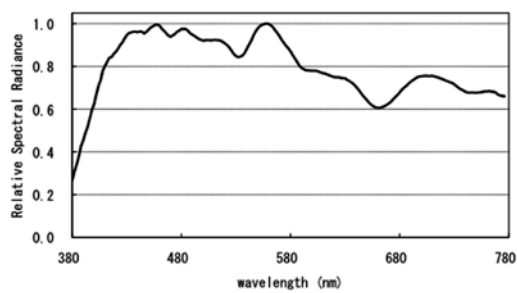
図2 分光反射率測定装置の概観。被測定物からの反射光に対して分光処理を行うことで、分光反射率を求めることができる。

とは前節で述べたが、このようなセンサによって色の成分が記録されたことになるため、カラーデジタカメラによる撮影は被写体を3色分解していることに相当する。色成分はバンドとも呼ばれ、3バンドを超えた際にはマルチバンド画像となり、歴史資料の分析や医療分野等での活用が研究されている [1]–[2]。マルチバンド画像は、それ自身が分析対象となるだけでなく、適切に設計されたシステムを用いれば、被写体の分光反射率を推定することも可能となり、推定結果に基づいた分析への応用も研究されている [3]–[4]。分光情報を文化財分析に活用する先行研究として、イコンの分光反射率を実測し、分光反射率に基づいた分析を行っている [5]–[6]。図2は、その分析のために使用した分光反射率測定装置の概観を示している [7]。この装置で使用されている光源は白色であり、資料からの反射光に対して分光処理が行われている。蛍光反応などの波長シフトが生じなければ、入射側で分光しても反射側で分光しても理論的には同一の結果となる。文化財保護の観点からすれば、入射光側で分光した方が資料に照射される総合的な光エネルギーが少なくすむことになるが、その際には資料面に対して照明ムラを生じさせることなく均質に資料を照明することが困難となるなど、長所短所が混在している。

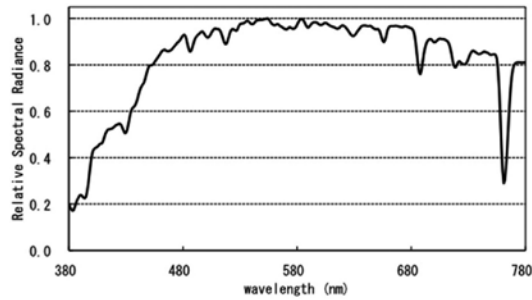
光源に含まれていない波長成分は、被写体はその波長に対する高い分光反射率を有したとしても結像には寄与しないことになるため、文化財写真のように被写体に関するより多くの情報を記録することが望まれる分野では、広帯域な波長成分を有する光源で照明する必要がある。しかし分析目的としては、着目情報が広帯域情報に隠蔽されることになるため、所望の情報を抽出するためには波長選択性が必要となる。

1.3 光源による波長選択性

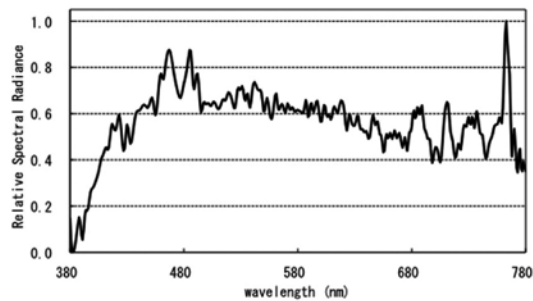
図3は、各種光源の分光分布を例示している。図の横軸は光の波長で単位は nm (ナノメートル) であり、縦軸は標準白色板からの反射光を計測し、各光源の最大値で正規化した相対分光分布である。図3(a)は、図2の分光反射率測定装置で使用している白色光源の分光分布であり、幅広い波



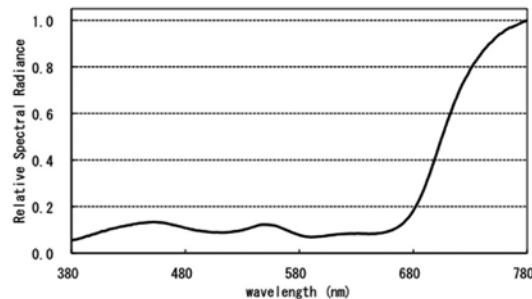
(a) 図2において使用した白色光源



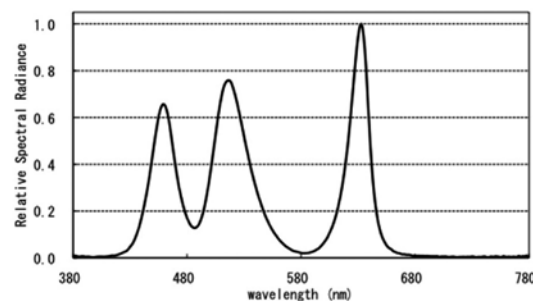
(b) 直射日光



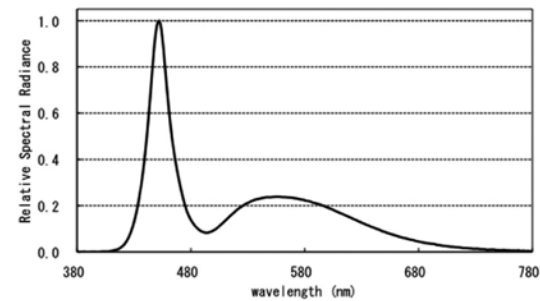
(c) 写真撮影用ストロボ



(d) 写真撮影用フラッドランプ



(e) LED プロジェクタの白色



(f) 携帯型白色LEDライト

図3 各種光源の各々の最大値で正規化した相対分光分布。標準白色板からの反射光を計測。

長成分を含んだ広帯域な分光特性を示している。図3(b)は、直射日光を標準白色板で反射させたときの分光分布である。概ね広帯域な分光分布を示しているが、短波長成分が相対的に少ないこと、長波長領域では大気における急峻な吸収スペクトルが現れている。図3(c)は写真撮影に用いられるストロボの一例であり、スパイク状の波長成分を含んでいる。同じく写真撮影用ではあるものの、図3(d)に示す写真撮影用フラッドランプではこのスパイク状の波長成分は現れていない。さらに、長波長になるほど多くの成分を有した光であることが分かる。図3(e)は、近年利用範囲が拡大しているLED (Light Emitting Diode: 発光ダイオード) を光源としたプロジェクタにより生成された白色であり、図3(f)は携帯型の白色LEDライトである。同じLED方式の白色でも、分光分布

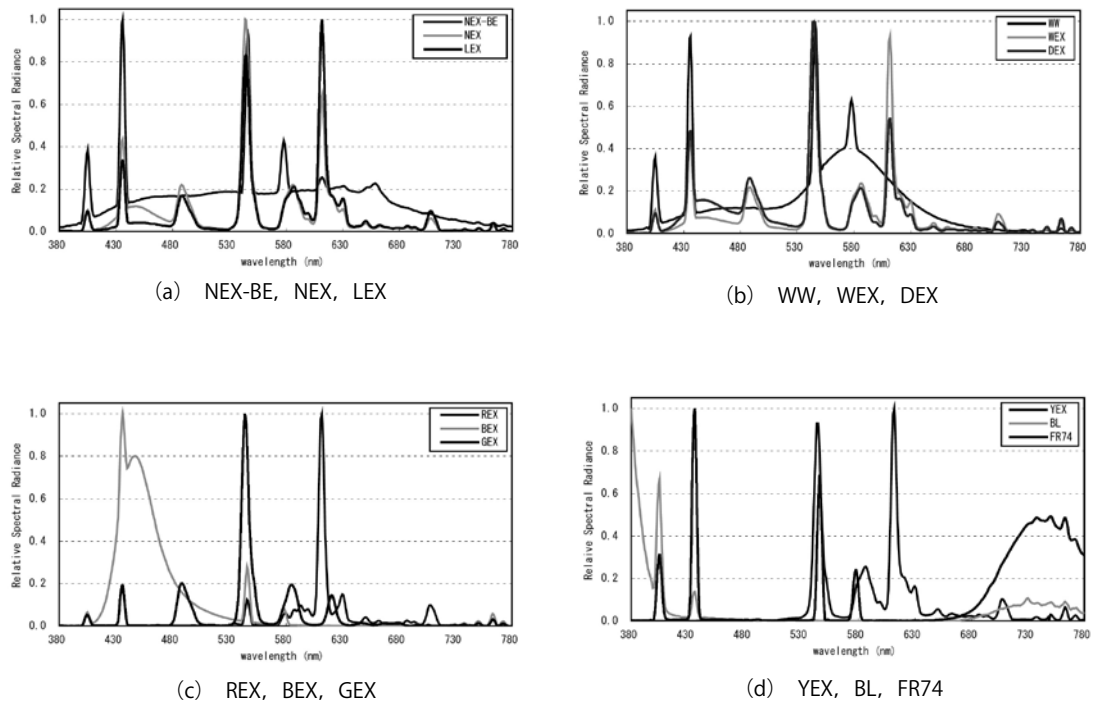
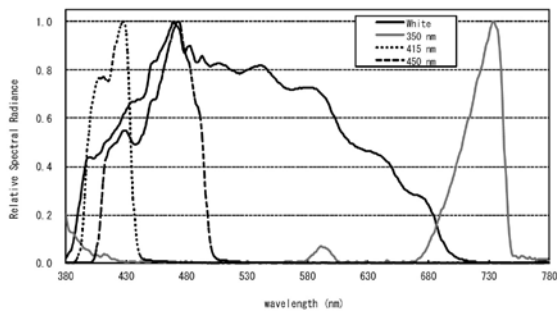


図4 蛍光灯照明の相対分光分布

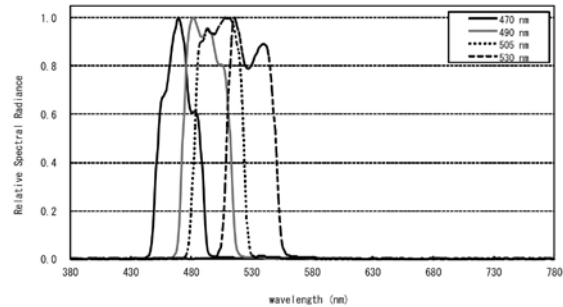
としては図3(e)と図3(f)に示されるような違いが有る。LEDは照明分野における近年のトレンド技術であり、従来は装置のインジケータ等に用いられる程度であったが、近年では高出力化や演色性の改善などの理由から、照明光源としても用いられるようになってきている。一般的にLEDの分光特性は単峰型の分光分布となるが、蛍光体と組み合わせることで直接発光以外の波長成分を含むLEDもある。図3(e)に示されるLEDプロジェクタによる白色は、赤、緑、青の単峰型分光分布を有する3色のLEDによって白色を作り出しているのに対して、図3(f)はピーク波長となるLEDに蛍光体が塗布されていることにより長波長の分光成分が生成され、結果として白色光源となっているなど、分光特性から光源種別を類推することも可能である。

蛍光灯は身近な光源であり、真空放電に起因する紫外線が蛍光体を励起することで可視光等が発せられる。従って、蛍光体を変更することで分光分布が変化する。図4は、異なる蛍光体がいわれている9種類の蛍光灯照明の分光分布であり、図4(a)はNEX-BE, NEX, LEX, 図3(b)はWW, WEX, DEX, 図4(c)はREX, BEX, GEX, 図4(d)はYEX, BL, FR74である。いずれの蛍光灯においても輝線が存在しているが、蛍光体の違いによる分光分布を読み取ることができる。

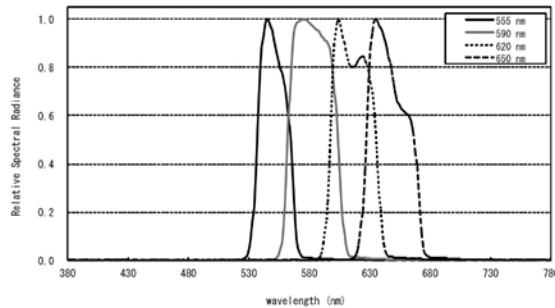
LEDおよび蛍光灯は、その発光原理や使用する蛍光体の特性によって、光源としての波長分布が決定されるが、白色光源にフィルタを作用させることでも発光分光分布を変化させることができる。フィルタを切り替えるための機構を装備し、複数のフィルタを内蔵している光源として法科学用光源があり、図5は法科学用光源(POLILIGHT PL500)の分光分布である。この光源はキセノンアークランプを光源として、フィルタ無しの状態で使用すれば白色光源となるが、11種類のフィルタ



(a) 白色, 350nm, 415nm, 450nm. 350nm フィルタについては, 使用した測定器の波長域が対応していないため短波長側が測定されていない。



(b) 470nm, 490nm, 505nm, 530nm



(c) 555nm, 590nm, 620nm, 650nm

図5 法科学用光源の分光分布

によって資料に照射する波長成分を切り替えることができる。法科学用光源は指紋検出などを主目的としてフィルタが設計されているが, 文化財の分析に対しても応用されている [8], [9]。

1.4 反射光に対するフィルタリングによる波長選択

被写体からの反射光に対してフィルタを作用させることで, センサに受光される波長を選択することについて述べる。撮影に使用するレンズの開口部に, ホルダ等を介してフィルタを装着する方法が一般的である。理論的には, 照明光側でフィルタを用いても反射光側でフィルタを用いても, 同じフィルタならば受光される分光成分に変化はないが, 被写体に照射される総エネルギー量や, 蛍光反応のように反射における波長シフトが生じる可能性などの観点から, どの段階で波長を選択するかは議論されなければならない。照明光側と反射光側の両方でフィルタを作用させることで, さらに複雑な波長選択を行うこともできる。

フィルタの波長選択能力は, その分光透過率によって定義される。図6は, 写真撮影用に市販されているフィルタ (富士フィルム SC-60) の分光透過率の実測値である。600nm 以下の分光透過率がほぼ0であるため, このフィルタを装着して撮影することにより 600nm 以下の波長をカットすることができる。カラーデジタルカメラに用いられている撮像素子にもフィルタが装着されており, 一般的にはそのフィルタは3種類ある。図6に示されるようなフィルタは, 撮影目的によっ

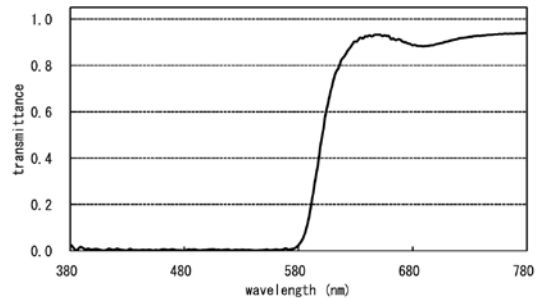


図6 フィルタ(富士フィルム SC-60)の分光透過率

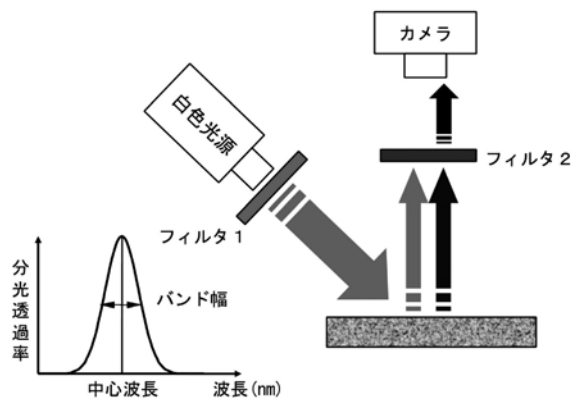


図7 蛍光反応の撮影原理

で装着するか装着しないかを撮影者が選択することができるが、撮像素子に装着されているフィルタは製造段階で取り付けられているため、撮影者が自由に取り替えることは極めて困難である。従って、カラーデジタルカメラを画像解析に用いるときには、撮像素子に装着されたフィルタによる波長選択が撮像の最終段階で行われることに注意が必要である。撮像素子によるフィルタリングを回避するためには、モノクロデジタルカメラを用いる必要があり、本研究でもカラーデジタルカメラだけでなく、モノクロデジカメも併せて使用している。

図7は、蛍光反応をフィルタリングによって撮影する原理を模式的に表したものである。白色光源にフィルタ1を作用させて、被写体に照射する光の波長を選択する。一般的には、物体による光の反射では入射光と反射光の波長は変化しないが、蛍光反応が生じた場合には入射光とは異なる波長の光が生じる。このシフトした波長成分を撮像するために、シフト波長成分のみを透過するフィルタ2を作用させることで蛍光反応成分だけを撮像することができる。これが蛍光写真の原理であるが、どのような光源とフィルタ1、フィルタ2を組み合わせるかは対象資料の分光反射率にも依存するため、現実的には試行錯誤によらざるを得ない。

②……………撮影画像の解析

2.1 テスト資料撮影

本稿では波長選択性のある照明光源として、主として法科学用光源と、異なる蛍光体が使用されている11種類の蛍光灯を使用する。図8は法科学用光源をセットした様子を示している。図8では利用状況を撮影するために室内照明も点灯しているが、実際の撮影では室内照明は消灯している。撮影カメラとして、モノクロカメラとカラーデジタルカメラを使用する。前述の通り、カラーデジタルカメラには撮像素子にカラーフィルタが装着されているために、撮影においてフィルタを使用すると多重の波長選択となる。対象資料は、形状及び色彩特性に違いのある火縄銃（銘：阿州山口喜代治直行）と錦絵（三代歌川豊国画 十二支のうち 寅、弘化4(1847)～嘉永5(1852)年の作）とするが、これらはいずれも研究用資料として用意したものであり、館蔵資料としては登録されていない。火縄銃は、発射後に残留している火薬などを可視化できるかを検討することが主目的である。錦絵は平面資料であり、色材の違いによる蛍光反応の調査と、波長選択的手段による画像解析の応用事例としての適性について検討する。



図8 法科学用光源をセットした様子

2.2 カラーデジタルカメラの各チャネル画像の比較

図9(a)は、法科学用光源（Rofin Australia社製 POLI Light PL500）で選択可能な白色光源により照明された火縄銃をカラーデジタルカメラで撮影した結果である。図の(b)から(l)は使用した法科学用光源のフィルタ中心波長を示しており、具体的な実測値は図5に示されている。図10は火縄銃の銃口部をカラーデジタルカメラで撮影した結果であり、図の(a)は白色光源による照明、

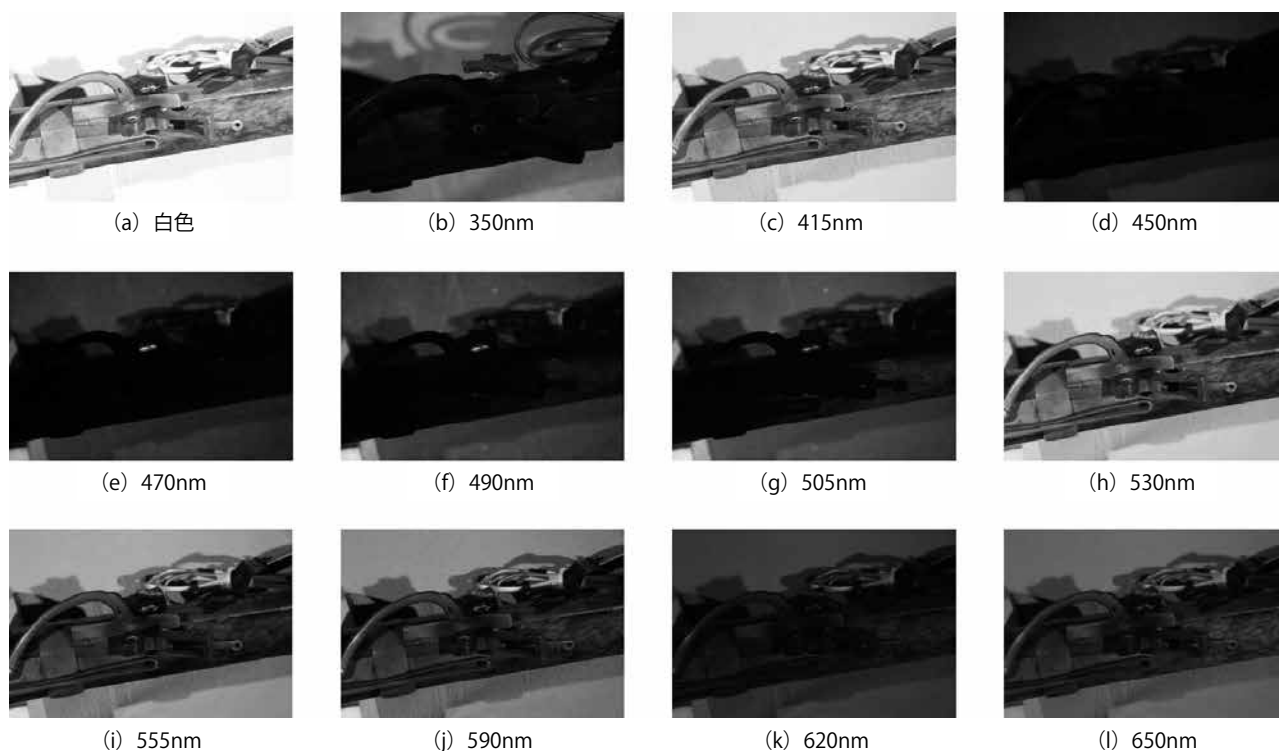


図9 法科学用光源に装備されているフィルタを用いて照明し、カラーデジタルカメラで撮影した画像
(論文末カラー図参照)



図10 銃口部を法科学用光源の白色光及び450nmフィルタで照明し、カラーデジタルカメラで撮影した画像
(論文末カラー図参照)

(b)は450nmフィルタを用いた照明で撮影した画像である。図9と図10はカラーデジタルカメラによる撮影のために、各フィルタを作用させた後の光源の色が画像として記録されている。どのような光源が用いられたのかを視覚的に知ることができるが、波長選択による被写体情報の抽出という観点では、この光源の色が被写体情報を隠蔽していることとなる。カラーデジタルカメラによって撮影された画像からの被写体情報の抽出ため、各カラー画像をチャンネル成分に分解する。図11は図9(b)のRGB各チャンネル画像であり、図12と図13は、図10(a)と図10(b)に示すカラー画像のRGBチャンネル分解画像をそれぞれ示している。カラー画像をチャンネル成分に分解して各成分を比較することで、被写体情報を抽出することも可能である。

異なる被写体に対する波長選択性を議論するため、錦絵に対して法科学用光源を適用した。図14は、本稿で用いた錦絵を図4(a)に示すNEX-BEタイプの蛍光灯(電通産業社製 高演色型昼白



図11 図9(b)に示すカラー画像のRGBチャンネル分解画像

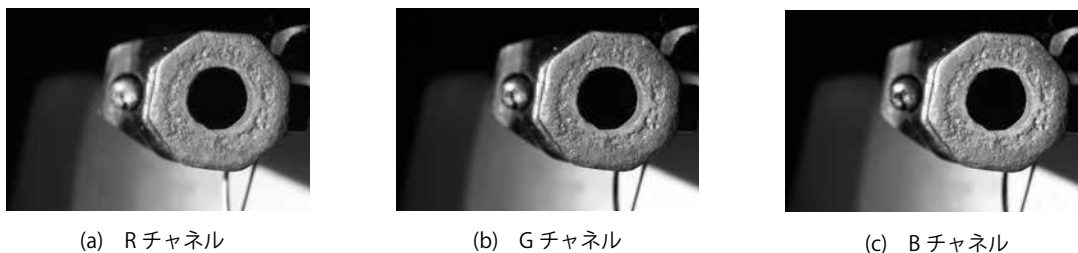


図12 図10(a)に示すカラー画像のRGBチャンネル分解画像

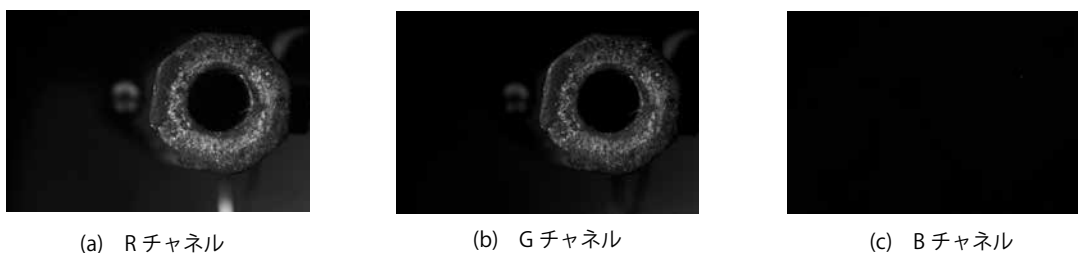


図13 図10(b)に示すカラー画像のRGBチャンネル分解画像

色タイプ)で照明し、カラーデジタルカメラ(キヤノン社製 EOS Kiss X2)により撮影した画像である。錦絵の下部には24色からなるカラーチャートを配している。図15は、この錦絵を図5(b)に示す法科学用光源の530nmフィルタ光で照明し、モノクロデジタルカメラ(PhaseOne社製 P45 Achromatic+)により撮影した画像である。カラーチャートは図14とは天地逆転していることに注意を要する。図15(a)はモノクロデジタルカメラの分光感度によって波長選択された結果であるが、モノクロカメラの感度波長域は広帯域であり、撮影時にフィルタを装着していないために多くの波長成分が積算された結果となっている。波長選択性を高めるため、照明光の中心波長である530nmをカットするSC-60フィルタを用いて撮影した結果が図15(b)である。図15(b)において、白く写っている領域ほど強い光がセンサによって受光されたことになるが、カラーチャートの白色部分よりも強い光が検出されている。さらに、図15(b)では照明光の波長成分を吸収するフィルタが作用されているため、図15(b)で白く写っている部分は入射光波長とは異なる波長成分を検出したこととなる。このような現象を生じさせる原因としては蛍光反応が考えられるため、図15(b)で白く写っている部分は蛍光反応を示した領域と推定することができる。

光源を変化させた際の撮影画像について議論するため、蛍光灯下においても錦絵を撮影した。図16は、図4に示す各種蛍光灯照明下でカラーデジタルカメラにより撮影した錦絵画像である。色再現の観点からは、同一の被写体が光源の違いによって再現される色が変化してしまうのは問題と



図14 図4(a)に示すNEX-BEタイプの蛍光灯で照明し、カラーデジタルカメラで撮影した錦絵画像
(論文末カラー図参照)



(a) 撮影用フィルタ無し



(b) 撮影時に図6に示すSC-60フィルタを装着

図15 図5(b)に示す法科学用光源530nmフィルタ光で照明し、モノクロデジタルカメラで撮影した錦絵画像。下部のカラーチャートは図14とは天地逆転している。



(a) BEX



(b) BL



(c) DEX



(d) FR74



(e) GEX



(f) LEX



(g) NEX-BE



(h) NEX



(i) REX



(j) WEX



(k) WW



(l) YEX

図16 図4に示す各種蛍光灯照明下でカラーデジタルカメラにより撮影した錦絵画像
(論文末カラー図参照)



図17 図16(b)に示すカラー画像のRGBチャンネル分解画像

なるが、分析用途とすれば、蛍光灯を切り替えることによる再現色の変化によって2次元的な広がりとして歴史資料を比較することが可能となる。白色蛍光灯下では同一の色彩に観察される領域が、別の蛍光灯下では異なった色彩に観察されるような現象が認められれば、その領域は異なる色材を用いて修復された可能性があることが示唆される。このような現象が観察される領域は、波長選択的手段による分析対象として有効である。図11から図13に示したチャンネル分解を、図16(b)に対して行った結果を図17に示す。各チャンネル成分を比較すると、図17(b)に示すGチャンネルにおいて、錦絵の背景部分において斑点状のムラのようなものが認められる。このムラ状のものはカラー画像においても僅かながら観察されるが、図17(b)Gチャンネルに現れているほど顕著ではない。

2.3 分光反射率推定結果との比較

文化財を分析する際に分光反射率を求めることは、資料分析において有用であるが、分光反射率を測定するためには図2に示したような装置が必要となる。そこで、デジタルカメラで撮影された画像から、画素毎に被写体の分光反射率を推定する手法が提案されている[10]。マクベスカラーチェッカを被写体として得られるセンサ応答 d_R, d_G, d_B と、それらの高次項からなるセンサ応答ベクトルを v とする。

$$v = [d_R, d_G, d_B, d_R^2, d_G^2, d_B^2, d_R d_G, d_R d_B, d_G d_B, d_R d_G d_B]^t \quad (5)$$

予め行った測定により得られているマクベスカラーチェッカの分光反射率をベクトル r とし、 r と v の相互相関行列 R_{rv} と v の自己相関行列 R_{vv} はそれぞれ次式で求める。

$$R_{rv} = \langle r v^t \rangle \quad (6)$$

$$R_{vv} = \langle v v^t \rangle \quad (7)$$

ここで、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を示している。分光反射率を推定するための推定行列 M は、次式で求められる。

$$M = R_{rv} R_{vv}^{-1} \quad (8)$$

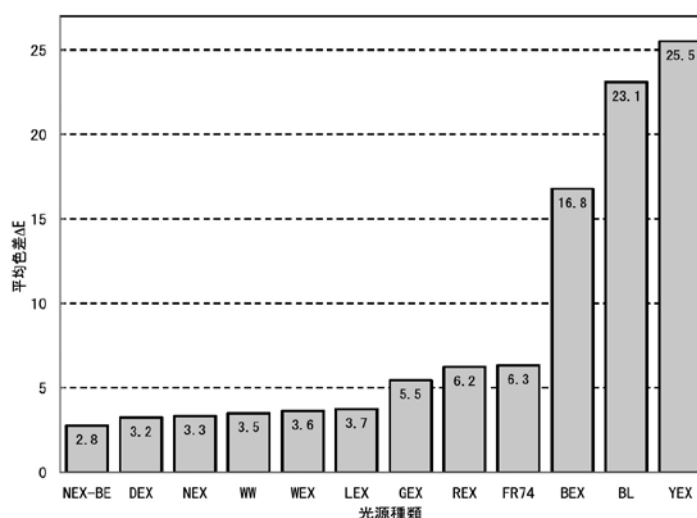


図18 マクベスカラーチェッカによる分光反射率の推定精度

推定行列 M が求められた後は、 M の導出と同じ環境で撮影された任意のデジタル画像から、被写体の分光反射率を推定することができる。異なる蛍光灯下で撮影された画像から分光反射率を推定し、マクベスカラーチェッカから計算される CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 均等色空間における色差 ΔE に基づいて分光反射率の推定精度を比較した結果を図 18 に示す。図 18 では図 4 に示す蛍光灯を用いて錦絵を照明し、同時に撮影されたマクベスカラーチェッカから色差を求めている。図から、白色光源による推定精度が高いことが示されている。ここで使用している ΔE は、 $L^*a^*b^*$ 均等色空間における 2 色間のユークリッド距離であり、式(9)で求められる。式(9)において、下付文字の m は実測分光反射率から導出された $L^*a^*b^*$ 色度値を示し、下付文字の e は推定分光反射率から導出された色度値であることを示している。

$$\Delta E = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \sqrt{\{L_{mi}^* - L_{ei}^*\}^2 + \{a_{mi}^* - a_{ei}^*\}^2 + \{b_{mi}^* - b_{ei}^*\}^2} \quad (9)$$

分光反射率の推定精度は、使用するカラーチャートの種類や照明などの撮影環境に依存する。本実験で使用している蛍光灯であれば、色再現を議論するならば被写体情報を均質に取得できる白色光源を使用することが一般的である。分析応用においては、光源の違いによる分光反射率推定精度の変化を分析のための情報として利用する。白色光源下で撮影されたデジタル画像から分光反射率を推定し、実験に使用した画像表示装置の特性を考慮してデジタル画像を再構成する。続いて、蛍光を発生すると推測される波長領域に重点的に発光エネルギーを有している光源下で撮影された画像に対しても同様に、分光反射率の推定を経由してデジタル画像を再構成する。このとき、蛍光反応が発生していれば波長シフトが生じることとなり、これによって分光反射率推定精度が低下すると仮定している。この低下した分光反射率の推定精度は、再構成されたデジタル画像に反映されることとなる。そこで、白色光源下で実際に撮影した画像と、推定された分光反射率を経由して再構成された画像との差分画像を作成する。再構成画像には、蛍光灯照明によって励起された蛍光成分によ



図19 図4(b)に示すWEXで照明した画像と、WEXに対する推定画像のGチャンネルの差分画像

て、局所的に分光反射率の推定精度が低下している領域が存在していると仮定する。さらに、この蛍光成分の波長域でフィルタリングが行われるデジタル画像の色チャンネルが存在していると考え、特定カラーチャンネル画像に撮影画像と推定画像の差分値が大きな値となる領域が波長シフトの結果として蛍光反応の可能性が高い領域として可視化されることとなる。図4(b)に示すWEX蛍光灯下における撮影画像と推定画像との差分画像を図19に示す。図19において、より白い領域がより大きな差分値であることを示している。

図19の有意性を考察するため、図15(b)と比較する。図19が蛍光反応を示していると結論づけるためには、科学的あるいは化学的な成分分析が必要となるが、現象として図15(b)と図19とでは類似の傾向を示している領域が認められるため、法科学用光源が利用できない状況でも、蛍光灯とカラーチャートがあれば、蛍光反応を示す可能性の高い領域を絞り込むことができると示唆される。

③……………考察

硝煙反応の検出を意図した法科学用光源の利用では、光源設計において検出効果があることが示されているが、本研究では明確な硝煙反応を認めることはできなかった。この理由として、本研究で用いた火縄銃に用いられている火薬の成分が、法科学用光源の設計で意図されている火薬成分とは異なることが考えられる。さらには、本研究では画像解析手法の構築を第一義としているため、撮影時におけるフィルタの利用は基本的な組み合わせにとどめていることも、検出精度に影響したものと考えられる。しかしこの結果から、本研究に用いた法科学用光源が文化財分析に利用できないというものではないことはここに強調しておく。画像解析の有用性の検証には事例の積み重ねが必要であり、本研究による結果もその一例として位置付けられる。硝煙反応を検出するためには原因物質の存在が必要となるが、その成分が法科学用光源に反応するとは限らず、さらにその原因物質が経年変化をおこしている、後世の洗浄等によって失われた等の事象も考えられる。方法の改善においては、このような保存状況を考慮することも必要である。錦絵に対しては、法科学用光源とフィルタの活用によって蛍光反応と考えられる領域を検出できていることから、法科学用光源による画像解析事例を収集し、有効性を継続検討する必要がある。

画像分析における共通事項として、画像分析のみでは分析を完結できないことが挙げられる。従って、本研究で示したいずれの結果に対しても、科学的あるいは化学的な分析手段によらなければ結果の妥当性を結論づけることはできない。しかし、詳細な分析を行うべき領域を弁別する等の初期分析を行うことが画像解析手段の役割であるとすれば、本研究で議論した手法によってその役

割を果たすことへの可能性が示されたと考えられる。

まとめ

画像解析を行う目的の一つに、対象資料における不可視情報の可視化が挙げられる。赤外線画像やX線画像は、その目的を達成するための手段として用いられる。しかしX線撮影を行うためには専用の設備と安全性への配慮、さらに状況によっては有資格者による運用が必要となることから、簡易な手段ではない。近年では、種々の光源が市販されており、写真撮影に転用することも可能である。波長選択の自由度も拡大しており、赤外線以外の波長成分を活用するための環境が整いつつある。赤外線はそもそも人間にとって不可視であるが、資料分析に有用な情報が可視波長域に存在していたとしても、他の情報に隠蔽されて、結果として不可視となる状況も起こり得る。このような情報を可視化することも不可視情報の可視化であり、波長を選択することは情報群から所望の情報を抽出するための手段となる。本稿で述べたように、照明光源や撮影時のフィルタを変更することで波長選択を行うことが可能なため、複数の照明光源下で資料を撮影しておけば、後に撮影画像を比較することで資料分析に有用な情報を抽出できる可能性が生じてくる。デジタル画像であれば、画像間での差分によって変化成分を抽出するなどの画像処理技術の適用も有効である。博物館業務として行われている資料の写真撮影を基本とした画像解析手段が構築できれば、業務を遅延させることなく資料情報の取得が可能となる。特殊な装置を利用することが難しい博物館外での資料調査等においても、デジタルカメラと波長選択性を考慮した撮像システム的应用によって、調査現場で資料情報を抽出できることとなる。

画像の中には多くの情報が含まれているが故に、解析に必要な情報が隠蔽されている可能性がある。波長選択という手段は、そのような膨大な画像情報の中から解析に必要な情報を抽出する手段の一つと位置付けることができる。本稿で行った波長選択手段は、個別の適用だけではなく互いに組み合わせることで、より解析の精度を高めることが可能であるが、どのように組み合わせることが有機的なのか、また画像解析と科学的あるいは化学的分析手法との連携方法を構築することが今後の研究課題である。

【謝辞】

図4に示した蛍光灯を貸与して頂いた電通産業株式会社、図5に示した法科学用光源に関する技術協力を頂いた株式会社日立ハイテクトレーディング、図15に示した画像の撮影に使用したモノクロデジタルカメラを貸与して頂いた株式会社堀内カラー、撮影に協力して頂いた本館管理部勝田徹氏に謝意を表明する。

参考文献

- [1] Norimichi Tsumura, Hideki Sato, Takayuki Hasegawa, Hideaki Haneishi, Yoichi Miyake, Limitation of color samples for spectral estimation from sensor responses in fine art painting, *Optical Review*, Vol.6, No.1, pp.57-61, 1999.
- [2] 横山康明, 細井麻子, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 絵画の記録・再現を目的とした高精細カラーマネージメントシステムに関する研究(第二報)ーヒューマンパーセプションを考慮した色再現ー, 日本写真学会誌, Vol.61, No.6, pp.356-362, 1998.
- [3] Norimichi Tsumura, Hideaki Haneishi, Yoichi Miyake, Independent component analysis of skin color image, *Journal of Optical Society of America A*, Vol.16, No.9, pp.2169-2176, 1999.
- [4] Hideaki Haneishi, Takuya Iwanami, Tomoyuki Honma, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Goniospectral Imaging of Three-Dimensional Objects, *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol.45, No.5, pp.451-456, 2001.
- [5] 宮田公佳, Alexey Andriyashin, Timo Jääskeläinen, Markku Hauta-Kasari, Jussi Parkkinen, 文化財解析のための分光情報の活用IIークラスタリングと主成分分析に基づいた色彩の特徴抽出に関する検討ー, 日本写真学会誌, Vol.72, No.2, pp.120-128, 2009.
- [6] 宮田公佳, Hannu Laamanen, Timo Jääskeläinen, Markku Hauta-Kasari, Jussi Parkkinen, 文化財解析のための分光情報の活用ーメタマ領域の検索手法ー, 日本写真学会誌, Vol.71, No.4, pp.276-286, 2008.
- [7] Hannu Laamanen, Timo Jääskeläinen, Markku Hauta-Kasari, Jussi Parkkinen, Kimiyoshi Miyata, Imaging Spectrograph Based Spectral Imaging System, *Proc. CGIV 2004 - Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, pp.427-430, 2004.
- [8] 城野誠治, 退色画像の可視化, そのデジタル画像保存について, 画像保存セミナー講演要旨集, 日本写真学会, pp.14-17, 2004.
- [9] 城野誠治, 壁画の画像形成について, 文化庁監修国宝高松塚古墳壁画, 中央公論美術出版, pp.17-19, 2004.
- [10] 津村徳道他, 重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, 光学, Vol.27, No.7, pp.384-391, 1998.

(国立歴史民俗博物館研究部)

(2011年7月14日受付, 2011年11月11日審査終了)

Basic Study on Imagery for Historical Artifacts Based on Spectral Selective Imaging Systems

MIYATA Kimiyoshi

Nowadays, imaging devices such as digital cameras and light sources have suitable performance for the imagery. In this article, a method to investigate historical artifacts based on imagery techniques is discussed and examined as a basic study. In the method, spectral selectivity is focused on to extract information from taken images of the artifacts. The selectivity of wavelength in spectra is realized by changing light sources and filters used in the imagery. The proposed method is aimed to be one of investigation procedures in a total artifact investigation system including scientific or chemical investigation methods. The proposed method is applied to a matchlock and a Nishikie prepared for the research purposes. As a result of this research, information that is invisible for the human visual system is extracted by the proposed method, however it is difficult to conclude that the extracted information could provide effectiveness for the artifact investigation because the proposed method is limited to the basic investigations. More experimental results by the proposed method as well as improvements of the analyzing technique is required to extract the information from taken images as future work.

key words: spectral imaging, imaging technology, filtering, image analysis

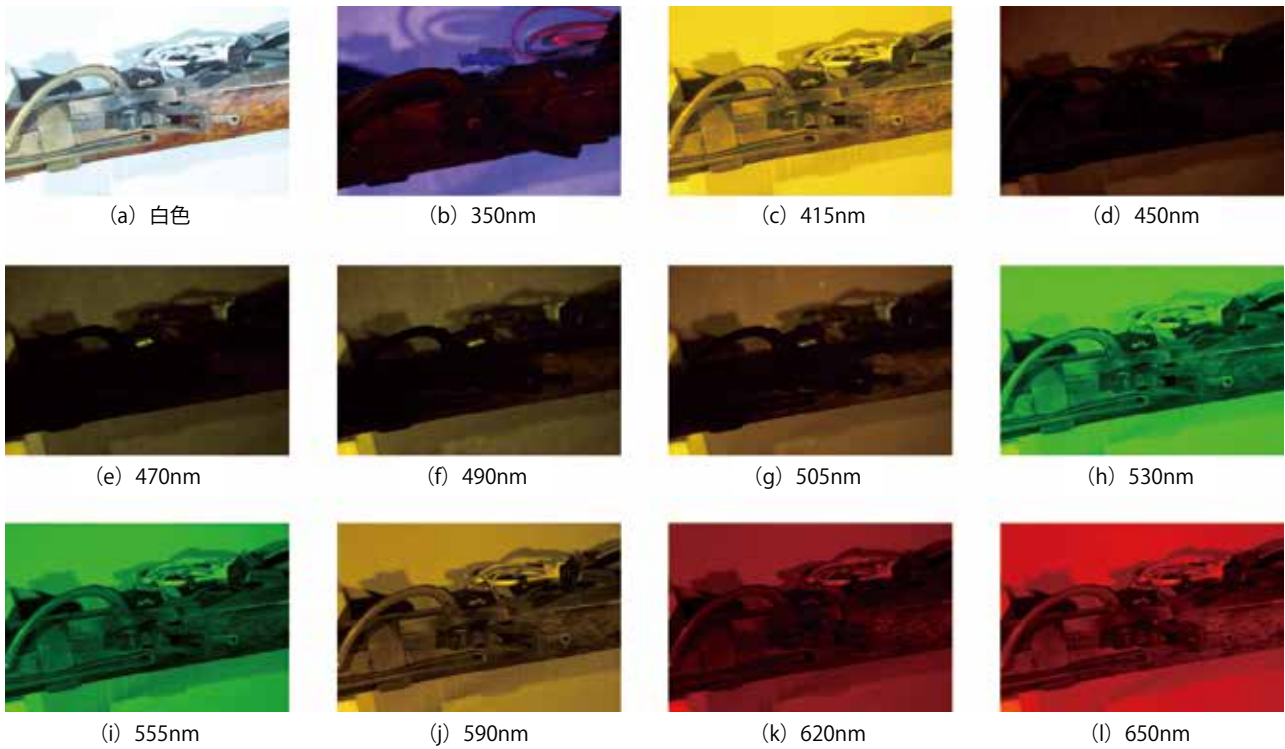


図9 法科学用光源に装備されているフィルタを用いて照明し、カラーデジタルカメラで撮影した画像



図10 銃口部を法科学用光源の白色光及び450nmフィルタで照明し、カラーデジタルカメラで撮影した画像



図14 図4(a)に示すNEX-BEタイプの蛍光灯で照明し、カラーデジタルカメラで撮影した錦絵画像



(a) BEX



(b) BL



(c) DEX



(d) FR74



(e) GEX



(f) LEX



(g) NEX-BE



(h) NEX



(i) REX



(j) WEX



(k) WW



(l) YEX

図16 図4に示す各種蛍光灯照明下でカラーデジタルカメラにより撮影した錦絵画像